

Por el Profesor de Geología de la Universidad  
Central, \_\_\_\_\_

X Sr. Dn. Augusto N. Martínez \_\_\_\_\_

X El Metamorfismo y las ro-  
cas antiguas de la Cordillera  
Oriental del Ecuador ==



ÁREA HISTÓRICA  
DEL CENTRO DE INFORMACIÓN INTEGRAL



# EL METAMORFISMO Y LAS ROCAS ANTIGUAS DE LA CORDILLERA ORIENTAL DEL ECUADOR

A todos, absolutamente a todos  
mis alumnos en el período univer-  
sitario de 1929 a 1933, con profundo  
carlño.

AUGUSTO N. MARTINEZ.

Quito, julio de 1933.



ÁREA HISTÓRICA  
PRIMERA PARTE

## El concepto moderno del Metamorfismo

### REFERENCIAS:

James Geikie: Structural and Field Geology.  
Fourth Edition. Edinburg 1920.  
Frank W. Clarke: The Data of Geochemis-  
try. Fourth Edition. Washington 1920.

### ESPECIALMENTE:

Emile Haug: Traité de Géologie. Paris 1921.

Ya en 1797, Hutton reconoció que ciertas rocas consti-  
tuídas principal o exclusivamente por elementos cristali-  
nos, no son sino rocas sedimentarias transformadas por la  
acción del calor y la presión. Ch. Lyell, les asignó, en 1825,  
el nombre de ROCAS METAMÓRFICAS y llamó METAMORFISMO  
al conjunto de fenómenos que dieron lugar a su transfor-  
mación.



## Caracteres generales de las rocas metamórficas y tipos principales

Como las rocas sedimentarias, las metamórficas, generalmente están estratificadas; son más o menos cristalinas y frecuentemente se observan en ellas todos los tránsitos entre las rocas enteramente compuestas de elementos cristalinos y las que no los contienen sino en cierta proporción, luego entre éstas y las sedimentarias intactas. En general, en una sucesión de rocas metamórficas, las más metamorfozadas, se hallan en la base de la serie y gradualmente se pasa hacia arriba a las menos metamórficas, para ir insensiblemente a las sedimentarias intactas, que ocupan la cúspide de la sucesión. Sin embargo, en algunos casos, se observan alternativas repetidas de rocas metamórficas y sedimentarias no transformadas.

A las series metamórficas, con frecuencia se las llama ESQUISTAS (pizarras) CRISTALINAS o FORMACIONES CRISTALOFÍLICAS, a causa de la predominancia del carácter esquistoso (pizarroso) de las estratas y, a pesar de la presencia frecuente de intercalaciones calizas, dolomíticas o cuarzosas, en que desaparece la estratificación de una manera más o menos completa. Antiguamente se consideraba a los terrenos cristalo-fílicos como los formados más remotamente en la superficie del globo y por esta razón se les daba el nombre de TERRENO PRIMITIVO. Hoy se sabe que son el resultado del metamorfismo de terrenos sedimentarios de edades muy diversas, sobre todo paleozoicas, pero, a veces, mesozoicas, quizás aún cenozoicas.

A este respecto ya no queda duda alguna. En efecto, se ha observado a menudo, en las esquistas cristalinas, intercalaciones de verdaderos conglomeratos compuestos de casquijos rodados sustraídos a terrenos más antiguos, sedimentarios, eruptivos o metamórficos.

Frecuentemente, grandes calizas lenticulares están intercaladas en medio de la serie cristalo-fílica; no difieren sino por la presencia de minerales especiales de intercalaciones del mismo género que se encuentran en las esquistas fosilíferas de la serie Paleozoica.



A menudo, las esquistas cristalinas alternan con las arcillosas, calcáreas o carbonosas, o con areniscas cuyo origen sedimentario es incontestable.

Aún más, se ha descubierto en medio de esquistas extremadamente cristalinas, fósiles más o menos bien conservados.

Por otra parte, las series cristalofílicas, frecuentemente pasan de una manera completamente insensible hacia arriba a depósitos cuyo carácter sedimentario no es dudoso. La cristalinidad aumenta gradualmente a medida que se descende en la serie.

Las esquistas menos modificadas, las que se encuentran de ordinario en la cúspide de una serie metamórfica, difieren de las puramente sedimentarias y formadas exclusivamente de elementos detríticos (cuarzo, feldespato, mica, cemento arcilloso), por la presencia de laminillas cristalinas de clorita o de sericita en extremo abundantes, sobre todo en las hojas de las esquistas, a las que comunican un aspecto satinado. Son las esquistas cloríticas y sericíticas (esquistas talcosas de los antiguos autores). Cuando son muy calcáreas las esquistas, se desarrollan cristales de granate (esquistas granatíferas).

Las calizas toman un aspecto cristalino, los fósiles desaparecen o se vuelven inconocibles, en toda su masa se forma gran cantidad de cristales de albita, casi siempre microscópicos. Charles Lory, observó esta albitización en numerosas calizas triásicas, liásicas y aún terciarias de los Alpes Franceses. También, a menudo, las calizas se vuelven granatíferas.

Si se aleja más de los sedimentos no metamorfolizados se comprueba que las esquistas se vuelven más ricas en mica, cuyas hojas entremezcladas forman lechos continuos, paralelos a los estratos primitivos. Los restos de cuarzo se redondean y se acunan, desaparece el cemento arcilloso, así como los otros elementos detríticos. La roca enteramente cristalina, toma el nombre de micaesquista (pizarra micácea). Localmente se desarrollan cristales de silicatos de aluminio, andalucita, disthena, estaurotida (esquistas andalucíticas, maclíferas, etc.). En otras ocasiones la mica está reemplazada por anfíbola hornblenda o por actinota; entonces se está en presencia de esquistas anfibólicas, o, cuando la anfíbola es absolutamente predominante, de anfibolitas.

Todavía a mayor distancia de las esquistas no metamorfolizadas, cristales de feldespato ortoclasa o de oligoclasa,



vienen a añadirse a los elementos de las micaesquistas, constituyendo a la roca que se llama gneiss. Aquí, generalmente, la mica forma lechos continuos, por lo que la esquistocidad es manifiesta. Los granos de cuarzo y de feldespato, a veces, están mezclados sin orden alguno, pero, muy a menudo, también el feldespato forma lechos regulares, en los que los cristales orientados en un mismo plano, pueden presentar en una sección perpendicular al plano de esquistocidad, una disposición en rosario, moldeándose los otros elementos al contorno de cada uno de ellos. A estos gneiss se los llama ENCINTADOS u OJOSOS. Los gneiss ofrecen numerosas variedades, que se hallan descritas en los tratados de Petrografía. Son ricos en elementos accesorios. Frecuentemente admiten, como las micaesquistas, intercalaciones de anfibolitas en lechos regulares o de calizas en grandes masas lenticulares. Estas calizas son muy cristalinas y contienen en gran número, cristales de granate o de mica. Entonces se llama CIPO-LINAS.

En los GNEISS GRANITOIDES, la esquistocidad se atenúa considerablemente y no se traduce sino por la orientación uniforme de las micas, que no constituyen ya lechos continuos. Existe una serie de tránsitos insensibles entre los gneiss granitoides y los granitos verdaderos. El granito está formado de los mismos elementos característicos que el gneiss. Varios autores le consideran, probablemente con razón, como el último término del metamorfismo, y quizás conviene atribuir el mismo origen a las rocas granitoides básicas, a la SYENITA, a la DIORITA, al GABBRO, etc.

En el granito, todos los minerales componentes son granos gruesos visibles a la simple vista, generalmente bastante desarrollados en todos los sentidos, salvo, a veces, grandes cristales de ortoclasa, que dan a la roca una apariencia porfíroide. Hay ausencia total de pasta (masa fundamental) y A FORTIORI, vidrio residual, pero, con todo, se puede distinguir netamente dos tiempos de consolidación sucesivos: 1º. cristales más antiguos, en parte rotos o corroídos, de apatita, zircon, esfena, biotita, de bisilicatos, de oligoclasa, de ortoclasa; 2º. un nuevo brote cristalino que sirve de cemento a los elementos precedentes y generalmente compuesto de ortoclasa y de cuarzo, a veces asociados a mica blanca. Por tanto, los granitos se caracterizan por el estado XENOMORFO de los elementos de la segunda consolidación.



En cambio, en las GRANULITAS, estos elementos en parte son AUTOMORFOS: el cuarzo adopta en ellas, lo más a menudo, formas independientes, bipiramidales. La mica blanca predomina allí y frecuentemente se encuentra también turmalina.

En las PEGMÁTICAS, finalmente, el cuarzo y el feldespato, cristalizaron simultáneamente, produciendo una estructura llamada GRÁFICA.

Por lo demás, es probable que las granulitas y las pegmatitas, tengan un origen diferente del de los granitos verdaderos.

En las rocas granitoides ácidas, el cuarzo y la mica blanca, en general, son los últimos elementos cristalizados. Algunos autores suponen que el cuarzo podría haberse desarrollado por vía secundaria, a muy baja temperatura, después de la formación de un magma principalmente feldespático.

Las rocas granitoides básicas están desprovistas de cuarzo, en ellas los feldespatos triclinicos reemplazan a la ortoclase y los elementos negros están constituidos por mica negra, hornblenda, augita, piroxenos rombicos.

Todas estas rocas no estratificadas granitoides, también han sido agrupadas bajo la denominación de ROCAS PLUTÓNICAS O ABYSSALES (INTRUSIVAS). La cuestión de su origen puede tratarse al mismo tiempo que el de las rocas cristalo-fílicas.

### Condiciones generales del Metamorfismo

En primera línea hay que mencionar una comprobación que tiene importancia capital en razón de las conclusiones que se sacan de ella y es que EL METAMORFISMO AFECTA CASI EXCLUSIVAMENTE A SERIES SEDIMENTARIAS DE UN ESPESOR MUY GRANDE. Es decir, está ligado a la presencia de los GEOSYNCLINALES. Casi siempre son las grandes masas de sedimentos acumuladas en ellos, las que han sido transformadas en rocas metamórficas y la transformación es, sobre todo más completa en las partes profundas de la serie. Por tanto, el metamorfismo es un fenómeno de profundidad. Con todo, excepcionalmente, se encuentra rocas sedimentarias de la su-



perficie, poco espesas, depositadas en aguas poco profundas, que han sido metamorfizadas al contacto de rocas volcánicas. En este caso, casi siempre se trata de una simple cocción de la roca y el metamorfismo no se extiende sino a débil distancia, al contorno de la roca eruptiva. Es el METAMORFISMO DE CONTACTO.

Los representantes de la antigua escuela plutoniana atribuían, siguiendo a Hutton, a la sola acción del calor central, la transformación de las rocas sedimentarias en cristalinas. Suponían una fusión completa de los sedimentos, seguida de cristalización. Sin embargo, no se encuentra en las rocas metamórficas, elemento alguno fundido. Ciertos cristales contienen inclusiones líquidas, cuya presencia es inconciliable con la intervención de temperaturas extremadamente elevadas. Además, si después de haber llevado por vía seca al estado de fusión una roca metamórfica, se deja enfriar la masa, se obtiene un vidrio sílico y no una roca cristalina. Por otra parte las rocas que resultan de la sodificación de masas en fusión, poseen una estructura completamente diferente de la de las rocas metamórficas.

Otra escuela que cuenta hoy todavía muchos adeptos, atribuye a las acciones mecánicas un papel preponderante en la formación de las pizarras o esquistas cristalinas. Admite que por el simple juego de las fuerzas que dan origen a los plegamientos, es decir, por el aplastamiento, la laminación de las esquistas arcillosas, pueden transformarse en cristalinas, rocas granitoides en verdaderos gneiss. Se ha denominado DYNAMO-METAMORFISMO, al conjunto de estos fenómenos.

Aunque las modificaciones producidas sobre las rocas por la acción de los movimientos orogénicos, frecuentemente son muy intensas, en general, son de orden puramente mecánico y no llegan a la composición mineralógica de ellas, que pueden haber experimentado dislocaciones muy intensas sin presentar la menor huella de metamorfismo.

Ha habido también geólogos que han sostenido la teoría que las esquistas cristalinas y las rocas granitoides, resultan de la transformación de rocas sedimentarias, por vía acuosa, sin intervención alguna de presiones o temperaturas elevadas. Verdad es que se sabe que las aguas que circulan en las capas superficiales de la corteza terrestre, originan numerosas modificaciones químicas en las rocas que atraviesan. Pero, estas modificaciones son en absoluto de otra naturaleza, ja-



más originan en las rocas que no contienen sino elementos dentríticos, a silicatos cristalizados; son fenómenos de hidratación, oxidación, cimentación, descalcificación, etc., que nada tienen que ver con el metamorfismo. Se les ha reunido bajo la denominación de fenómenos de METASOMATOSIS.

Por consiguiente, ni la presión, ni la temperatura, ni la circulación de las aguas, ACCIONANDO SOLAS, pueden dar lugar a fenómenos de metamorfismo, pero, la acción combinada de estos tres agentes, o en otros términos, la acción del agua bajo presión a alta temperatura, en particular en presencia de los álcalis da cuenta perfectamente de la formación de las rocas cristalofílicas, aún de ciertas rocas granitoides, a expensas de las rocas sedimentarias. A Scheerer de Christiania, le toca incontestablemente el mérito de haber sido el primero ya en 1847, en demostrar la acción concomitante de la temperatura, de la presión y del agua, en los fenómenos del metamorfismo. Más tarde, Daubrée demostraba por experiencias sintéticas memorables, la acción que ejerce el vapor de agua bajo presión, sobre los silicatos: disolución, formación de nuevas combinaciones, cristalización muy abajo del punto de fusión.

Las tres condiciones necesarias para explicar los fenómenos de metamorfismo, se encuentran realizadas en las regiones profundas de los GEOSYNCLINALES.

El agua existe en todos los sedimentos, aún se puede decir, en todas las rocas se infiltra a grandes profundidades.

La presión es función del espesor de los sedimentos acumulados y de su densidad. La enorme potencia de las capas apiladas en ciertos GEOSYNCLINALES, indica suficientemente que presiones deben experimentar los depósitos formados más antiguamente.

También la temperatura es muy elevada en el fondo de los GEOSYNCLINALES, pero sólo excepcionalmente alcanza al punto de fusión de las rocas silicatizadas.

Nos precisa dar de esto la demostración:

GEOTERMIA. Las variaciones estacionales de la temperatura no se dejan sentir en el suelo más allá de una cierta profundidad variable, desde luego, según la latitud geográfica. Así un termómetro colocado en los sótanos del Observatorio de París, a 28 metros de profundidad, señala desde 1783, la temperatura constante de 11,86 grados.



Si se descende más en el suelo, se comprueba que, desde la zona de temperatura constante, ésta aumenta con la profundidad. Observaciones hechas en las minas, tomando la temperatura, no en el aire de las galerías sino en la roca misma, muestran que este aumento sigue una progresión regular. Se ha denominado GRADO GEOTÉRMICO la profundidad que se baja verticalmente para observar un aumento de temperatura de 1 grado centigrado.

Se ha comprobado en diversas minas variaciones bastante notables en el grado geotérmico, según la mayor o menor conductibilidad de la roca, según que se atravesase o no filones metalíferos, según que se encuentre o no en la proximidad de rocas volcánicas. En las minas metálicas, el grado geotérmico es, en término medio de 41 m. En las minas de hulla generalmente es inferior a ese número en más de la mitad, porque los terrenos atravesados son menos buenos conductores del calor. En las regiones volcánicas el grado geotérmico es también poco elevado, pero en este caso, es el calor almacenado en las rocas desde las últimas erupciones el que determina un aumento mucho más rápido de temperatura, yendo, por ejemplo, hasta 6 grados por 100 m. en un sondeo de 1.200 m., hecho en los alrededores de Riom (Michel-Levy).

Las observaciones de temperatura de las aguas saltadoras de los pozos artesianos, dan resultados más concordantes; permiten asignar al grado geotérmico un valor medio de 31 m. El pozo artesiano de Grenelle, posee una profundidad de 548 m. y allí salta el agua a una temperatura de 28 grados. Inversamente, se puede deducir de la temperatura de una fuente termal, la profundidad de su lecho de origen.

Medidas de temperatura particularmente precisas se hicieron cuando el sondeo de Sperenberg, cerca de Berlín. El factor conductibilidad se encontró eliminado, ya que en este sondeo de 1.273 m. se quedó constantemente en una masa homogénea de sal gemma. La media de las observaciones da un grado geotérmico de 33,7 m. En el sondeo de Schladebach, en la provincia de Sajonia, que alcanzó a 1.748 m. de profundidad, la cifra obtenida fué algo superior, 35,70 m. En el Parusschowitz, en la Alta Silesia, que en 1893 alcanzó algo más de 2.000 m., se observó una temperatura de 69,3 y se calcula un grado geotérmico medio de 34,1 m.



En todos estos sondeos se ha comprobado un crecimiento regular de la temperatura con la profundidad; sin embargo, parece que el valor del grado geotérmico aumenta también muy ligeramente con la profundidad y que en todos los casos, jamás disminuye. Haciendo abstracción de las irregularidades siempre poco considerables y tomando 33 m. como grado geotérmico medio, se puede avaluar en un mínimo de 150 grados la temperatura que reina a los 5.000 m. de profundidad y se puede concluir en la existencia de una temperatura por lo menos de 2.000 grados, suficiente para mantener en el estado de fusión a todas las rocas conocidas desde la profundidad de 66 km., insignificante en relación a la longitud del radio terrestre. Existe pues en el interior del globo una fuente propia de calor y la disminución de la temperatura hacia la superficie se debe a la radiación de la tierra hacia los espacios celestes.

Ahora apliquemos estos datos a los GEOSYNCLINALES.

Sabemos que la temperatura del fondo de los mares se arregla por la circulación oceánica y que en manera alguna tiene influencia una fuente de calor situada en la profundidad. Por tanto, es casi cierto que la temperatura aumenta también regularmente hacia el centro de la tierra, partiendo desde el fondo de los océanos, como lo hace en los continentes desde la zona de temperatura constante. Si llamamos ISOGEOTERMAS las superficies del interior de la tierra que poseen la misma temperatura, claro está que estas geotermas son paralelas a la superficie de la lithoesfera. Con todo, están más espaciadas en las regiones polares más aproximadas en las ecuatoriales; además, experimentan una cierta depresión debajo de los macizos montañosos elevados en razón de la baja temperatura que reina en las grandes alturas.

Si en un GEOSYNCLINAL los sedimentos se acumulan sin cesar, mientras que la profundidad del mar queda constante, sucederá que los sedimentos más antiguamente formados INMERGIRAN en zonas de temperatura más y más. Una acumulación de sedimentos de 1.000 m. traerá una elevación de temperatura del antiguo fondo del mar, de cerca de 30 grados y como las acumulaciones de 10.000 m. no son un hecho excepcional en los GEOSYNCLINALES, los primeros sedimentos formados serán así llevados gradualmente a una temperatura de 300 grados.



Por otra parte, también se puede suponer que el fondo primitivo de la cuenca quede fijo y que los sedimentos se acumulen de manera de colmar totalmente a la depresión.

En este caso las isogeotermas se elevarán gradualmente de manera de formar, no ya superficies cóncavas, sino planas, y los sedimentos depositados en el origen se encontrarán conducidos a una temperatura que será función del espesor de la colma. De esta manera es cómo explican Babbage y Herschell la elevación de temperatura que puede experimentar el antiguo fondo de una cuenca. Creían suficiente esta elevación para acarrear una dilatación de las capas, seguida de movimientos del suelo o sea para dar lugar a la formación de rocas metamórficas.

De lo que precede, resulta en todos los casos, que en los GEOSYNCLINALES el espesor de los sedimentos acumulados es bastante considerable para estar en el derecho de admitir que las capas más profundas están sometidas a temperaturas de varias centenas de grados. Ciertamente estas temperaturas son suficientes para explicar, en concurrencia con la presión y el agua, los fenómenos del metamorfismo.

En ciertos casos extremos, las temperaturas quizás eran bastante elevadas para conducir al estado de fusión ígnea a los silicatos más difícilmente fusibles.

### Relaciones del granito con las rocas encajantes

Desde fines del siglo XVIII Hutton emitió la opinión que el granito resulta de la fusión de rocas detríticas bajo la acción de la temperatura elevada que reina debajo de los océanos, en las profundidades de la tierra. Esta manera de considerar al granito como una roca metamórfica se conservó, por los primeros autores que sustituyeron a la hipótesis del origen ígneo del granito la de la formación de esta roca por la vía hidrotermal, por Scheerer, Virlet d' Aoust, Delesse. Este último, en 1822, resumía con los términos siguientes su punto de vista: «*Las rocas plutónicas se han formado a expensas de las metamórficas y representan el máximo de intensidad o el término extremo del metamorfismo general*».



Estas ideas sobre el origen metamórfico del granito, aceptadas en América (Sterry, HUNT, Dana, Le Conte) no hallaron en Europa sino un débil eco. Aquí el granito era y es todavía considerado por un gran número de geólogos, sea como la primera costra sólida formada en la superficie del globo, sea como una verdadera roca eruptiva y se consideran a los gneiss bajo el imperio de las teorías dinamometamórficas, sea como granitos laminados (Rosenbusch), sea igualmente como el resultado de una primera consolidación (J. Roth), o todavía, como sedimentos de origen químico formados en condiciones especiales (Gümbel). Por tanto, importa estudiar más de cerca las relaciones de los granitos con las rocas encajantes.

Por todas partes en que el granito aparece a flor de tierra, tenemos pruebas que en otro tiempo estaba cubierto por espesas capas de terrenos sedimentarios y que éstos fueron posteriormente sustraídos por fenómenos de erosión. El granito se halla, sea en regiones en que los terrenos han experimentado dislocaciones intensas, de tal manera que los granitos y las esquistas cristalinas forman macizos anticlinales, bien individualizados, frecuentemente de gran altura; sea en el fondo de los valles que tocan profundamente a las cadenas de montañas; sea en países que han sido nivelados más o menos completamente por los agentes atmosféricos y transformados en peniplanas.

Particularmente en este último caso, el granito aflora bajo la forma de superficies circulares o elípticas en medio de las regiones esquistas que representan la sección horizontal de LINGOTES, tanto más extensos cuanto el país está más profundamente denudado. Es hacia su vértice sobre todo que estos lingotes emiten digitaciones, APOFISIS simples o ramificadas, a menudo tortuosas, que penetran en las rocas encajantes. Es evidente que para formar estas digitaciones, el granito debía encontrarse por lo menos en estado pastoso, pero hay que notar que en algunos casos las formaciones sedimentarias circundantes no presentan huella alguna de metamorfismo. Parecería pues que la masa pastosa, ya considerablemente enfriada, fué inoculada por acciones mecánicas a las hendiduras de las rocas encajantes.

En todo caso, los ejemplos de granitos que penetran en formaciones sedimentarias sin producir el menor metamorfismo, son completamente excepcionales. En general, las rocas



encajantes están modificadas considerablemente, tanto al contacto de las apófisis como al contorno de los lingotes.

Los afloramientos de granito están rodeados de aureolas concéntricas de rocas metamórficas que acusan un metamorfismo decreciente a medida que se aleja de la roca cristalina. Las syenitas, algunas diabasas, los gabbros, producen acciones metamórficas completamente semejantes. Notable es la analogía entre estas modificaciones producidas por las rocas granitoides y los fenómenos que se observan en el contacto de ciertas rocas incontestablemente eruptivas. La diferencia reside, sobre todo, en la intensidad; en uno y otro caso se trata manifiestamente de acciones caloríficas, debidas a la proximidad de una masa en estado pastoso.

La semejanza es todavía mucho mayor cuando la roca encajante es una caliza. Sea en el caso de un granito o de otra roca granitoide, sea en el de una roca volcánica, hay formación en la masa calcárea de silicatos cálcicos, tales como el granate, vesuviana, wollastonita, etc. El aporte de sílice que se sustituye parcialmente al ácido carbónico es entonces incontestable.

Todos estos hechos parecen apoyar la asimilación de las rocas granitoides a rocas eruptivas. También muchos petrógrafos no ven entre las diversas rocas cristalinas endógenas, sino diferencias que resultan de la consolidación ya profunda, ya abyssal, ya superficial en el caso de las rocas volcánicas efusivas o de derrame. Las unas y las otras provendrían de un MISMO MAGMA INICIAL.

Con todo hay dificultades que se oponen a la hipótesis de un origen ígneo del granito y otros hechos van a demostrarnos que las aureolas de contacto no son las únicas transformaciones producidas en la proximidad de las masas graníticas.

Frecuentemente se encuentra al contacto del granito y granulita, un gran desarrollo de cristales de turmalina o de topacio, o de micas fluóricas que indican el aporte en la roca encajante de ácido bórico, de ácido fluorhídrico, sustancias a las que Elie de Beaumont atribuyó con justicia un papel MINERALIZADOR.

Existen todavía al contacto de los granitos, aportes de otra naturaleza, cuyo alcance teórico es considerable.

Al contacto mismo del granito y de las rocas encajantes se ha observado una zona angosta, en la que se han des-



arrollado numerosos cristales de feldespato, visibles aún a la simple vista. No se puede desconocer en esta zona feldespática un aporte de álcalis, soda o potasa, según los casos. Y es en esta zona que frecuentemente no alcanza sino algunos metros de espesor, que se encuentran la mayor parte de las rocas cristalofílicas: micaesquistas, gneiss, anfibolitas, leptynolitas (esquistas micáceas feldespáticas). Se extiende y gana en importancia a medida que la erosión nos permite observar las raíces de los aparatos graníticos a una profundidad mayor. Así, poco a poco, se alcanzan niveles en que se desarrollan sobre grandes extensiones esquistas feldespatizadas que no difieren en nada del gneiss. EL METAMORFISMO DE CONTACTO SE CONFUNDE, POCO A POCO, EN PROFUNDIDAD CON EL METAMORFISMO GENERAL (Michel-Levy).

El desarrollo de los feldespatos se hace ya por IMBIBICIÓN, sin que la estructura de la roca se modifique notablemente; ya por INYECCIÓN del granito mismo, entre las hojillas de la esquistas.

Los gneiss no serían otra cosa sino esquistas feldespatizadas sobre grandes extensiones en la proximidad de masas graníticas a las que se las ve pasar insensiblemente. Las anfibolitas corresponderían a bancos de calizas intercalados en las esquistas.

Este modo de metamorfismo parece caracterizar a las regiones más profundas de los GEOSYNCLINALES.

Las acciones metamórficas ejercidas al contacto del granito o en su proximidad pueden calificarse de EXOMORFAS, en oposición a las ENDOMORFAS, que comprenden las modificaciones que se producen en el granito mismo cuando atraviesa rocas de una composición determinada. Michel-Levy demostró que los granitos se vuelven básicos al contacto de calizas, se cargan de hornblenda y pierden cuarzo. Mas, recientemente Lacroix aduce innumerables ejemplos de estas acciones metamórficas endomorfas.

En los macizos graníticos sin zona feldespática al contacto nada se observa de análogo, de manera que los petrógrafos de la escuela alemana niegan el influjo de las rocas encajantes sobre la composición del magma granítico.

Pero hay más. Los granitos frecuentemente contienen en mayor o menor cantidad ENCLAVES de rocas de composición diferente de la de la masa. Es preciso no confundirlos con las SEGREGACIONES ácidas o básicas que a menudo ofrecen



las rocas granitoides y que contienen los mismos minerales que la masa de la roca, aunque en proporción diferente. Los enclaves propiamente dichos son fragmentos de rocas extrañas a la masa. Lacroix les califica de ENALOGENOS en oposición a los HOMAEOGENOS, que presentan con la roca englobante una mayor o menor analogía de composición mineralógica y de origen.

Los enclaves de granito ordinariamente son fragmentos de esquistas englobadas. La esquistocidad es netamente visible, quedando a veces orientados como las esquistas próximas. Frecuentemente hay absorción parcial de los enclaves sobre sus bordes y tránsito insensible a la masa granítica. Allí se encuentran todos los minerales de contacto de la zona feldespática. Por tanto los enclaves son manifiestamente fragmentos no asimilados o incompletamente digeridos de la roca que se encontraba primitivamente en el emplazamiento del granito. Las areniscas resisten más que las esquistas a la absorción y se ha comprobado que capas de areniscas metamorfizadas persisten en medio del granito después de la asimilación, más o menos completa, por éste, de las esquistas, con las que estaban originalmente interestratificadas.

Del conjunto de estos hechos se ha deducido la conclusión de que el granito es susceptible de hacerse lugar, sin gran desarreglo de las estratas que atraviesa por asimilación lenta y parcial de las rocas que sustituye. La proximidad de la roca eruptiva habría conducido a una sobreelevación de las curvas isotérmicas en las relaciones muy profundas de las esquistas y una circulación intensa de los mineralizadores (probablemente alcalinos).

Sin tratar de negar la posibilidad de la ascensión del magma granítico que al contrario es muy verosímil en ciertas condiciones, se puede preguntar si verdaderamente es necesario admitir, en todos los casos, la existencia de un magma que venga de la profundidad. La formación gradual del GEOSYNCLINAL basta para explicar la elevación de la temperatura y de la presión y por tanto, de la acción más intensa de los mineralizadores. Si se supone un descenso gradual del fondo del GEOSYNCLINAL, en regiones más y más profundas, se puede admitir que las capas sedimentarias sumergidas en zonas isogeotérmicas de creciente temperatura, finalmente se encuentran en condiciones de temperatura y de presión tales que la acción de los mineralizadores bastará para trans-



formarlas total o parcialmente en magma granítico. Después del enfriamiento, las rocas sedimentarias se hallarán reemplazadas según su naturaleza por granito u otras rocas granitoides. Lateralmente, y por tanto a una profundidad menor, las mismas capas serán inyectadas por el magma granítico o impregnadas, merced a la acción de los mineralizadores, más fácil según los planos de estratificación. En las partes más elevadas de la roca transformada en granito, se producirán estos mismos fenómenos en una latitud menor y, finalmente, a una altura más considerable todavía, o, en otros términos, a una profundidad menor, el aporte de los mineralizadores será justamente suficiente para originar a un magma granítico y será impotente para modificar la composición química de las aureolas del contacto.

Sólo excepcionalmente y probablemente bajo la acción de empujes orogénicos, ciertas partes del magma granítico, todavía plástico, pero ya sensiblemente enfriado, podrán hallarse presionadas en los vacíos preexistentes y conducidas por una ascension vertical a las regiones superficiales de la corteza terrestre. En este caso, los fenómenos de contacto estarán siempre muy poco desarrollados.

Muy bien se puede concebir la subida vertical de fluidos mineralizadores, la filtración de vapores al través de las capas de la lithoesfera, pero es menester fisuras preexistentes y empujes de una naturaleza especial, para explicar la ascension de un magma fundido. Nada demuestra en la generalidad de los casos, que el granito se haya así elevado a la manera de una roca volcánica.

La ascension de los mineralizadores igualmente está favorecida por la presencia de hendiduras preexistentes, pero, también parece posible por simple filtración en capas no fisuradas. Termier ha explicado así las intercalaciones de rocas cristalinas básicas (gabbros, peridotitas, anfibolitas y micaesquistas clorotizadas) en medio de inmensas series de esquistas lustradas mesozoicas de los Alpes del Piamonte. En parte alguna no existe CHIMENEA que permita admitir la ascension de un magma fundido. Las «Rocas Verdes» constituyen lentejas interestratificadas, formadas completamente al contorno de las columnas filtrantes, en el plano de las capas de manera muy desigual según su permeabilidad. Su naturaleza dependería únicamente de las pérdidas experimentadas en cada punto por la columna filtrante.



EN RESUMEN el metamorfismo se reduce a la acción de los mineralizadores, facilitada por presiones y temperaturas elevadas. Los principales mineralizadores parecen ser los siguientes: la sílice, el agua, los álcalis y otras bases: magnesia, óxido de hierro, etc., principios capaces de formar al cuarzo, a los feldespatos; luego el ácido bórico y compuestos fluorados y clorados, que han debido intervenir en la formación de la turmalina y de las micas.

Mientras que los sedimentos llevados por el juego de los GEOSYNCLINALES a las mayores profundidades están sin duda enteramente fundidos y transformados en un magma ígneo, aquellos que alcanzan isogeotermas que corresponden a temperaturas menos elevadas están completamente impregnados por mineralizadores que obran bajo presión y a una temperatura que alcanza probablemente todavía varias centenas de grados. El origen de estos mineralizadores, probablemente debe buscarse en las masas fluidas subyacentes.

Las capas más fuertemente impregnadas se transforman, según su naturaleza, en granito o en rocas granitoídes básicas. Más arriba la impregnación de las esquistas se sucede lecho por lecho y el desarrollo de los feldespatos crea al gneiss, mientras que las calizas se vuelven cristalinas y se cargan de silicatos cálcicos. Más arriba todavía, los vapores mineralizantes atraviesan las estratas por filtración y desarrollan en su masa una cristalinidad general y localmente conjuntos lenticulares de rocas cristalinas no estratificadas.

Frecuentemente las aguas de infiltración superficial vienen a modificar la composición de los minerales formados por el metamorfismo general, o, todavía el tránsito de rocas volcánicas determina una cocción local, o, en fin, la acción mecánica de los movimientos orogénicos viene a añadirse a la de los agentes del metamorfismo. A menudo es difícil conocer la parte de las modificaciones imputables a cada una de estas causas.